МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 621.01 10.23947/1992-5980-2017-17-3-38-45

Обеспечение надежности технологических процессов вибрационной отделочно-упрочняющей обработки деталей в среде стальных шаров*

М. А. Тамаркин[1], Э. Э. Тищенко[2], А. В. Гордиенко[3], Р. В. Гребенкин[4]**
[1, 2, 3] Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Reliability control of final vibration strengthening of part processing in steel balls medium***

M. A. Tamarkin[1], E. E. Tishchenko[2], A. V. Gordiyenko[3], R. V. Grebenkin[4]**
[1, 2, 3] Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Введение. В статье представлены результаты исследований процесса вибрационной обработки деталей в среде стальных шаров. Выявлены технологические возможности обработки. Рассмотрено понятие надежности технологического процесса. Выявлены факторы, оказывающие влияние на выходные параметры объекта управления (технологического процесса) с точки зрения обеспечения его надежности, и показатели, с помощью которых можно оценить надежность технологического процесса.
Материалы и методы. В качестве объекта для исследования надежности выбран технологический процесс вибрационной отделочно-упрочняющей обработки в среде стальных шаров, который может осуществляться на операциях упрочнения и отделки деталей, скругления острых кромок, подготовки деталей под покрытия (гальванические, лакокрасочные, резиновые, клеевые и др.). Использовались образцы из различных материалов, применяемых в машино- и приборостроении.
Результаты исследования. Получен комплекс моделей формирования показателей надежности технологического процесса, позволяющих обеспечить повышение эффективности обработки и достижение заданной величины и стабильности параметров качества обрабатываемой детали. Установлены зависимости для определения среднего арифметического отклонения профиля шероховатости поверхности, глубины упрочнения и степени деформации, времени обработки. Проведен комплекс экспериментальных исследований, результаты которых подтверждают адекватность теоретических зависимостей.
Обсуждение и заключения. Пользуясь комплексом полученных моделей, можно рассчитать величину показателей точности на стадии технологического проектирования, что позволит прогнозировать надежность технологического процесса, принятого к производству.

Introduction. The research results of the vibration part processing in the steel balls medium are provided. Technological capabilities of the treatment are identified. The concept of process reliability is considered. Factors affecting the output parameters of a (process) control object from the point of view of its reliability, and indicators for estimating the process reliability are determined.
Materials and Methods. As an object for the reliability research, the vibration finishing-strengthening processing in the steel balls medium is selected. This process can be performed on the part hardening and finishing operations, peening, and coating (galvanic, paint, rubber, adhesive, etc.) preparation of parts. Samples from various materials applied in machine industry and instrument-making are used.
Research Results. A set of models for forming process reliability indices that allow providing increase in efficiency and reaching the specified value and stability of quality parameters of the processed part is obtained. Dependences for the determination of arithmetic average surface roughness, hardening depth, deformation ratio, and cutting time, are determined. A set of pilot studies which results confirm adequacy of the theoretical dependences is carried out.
Discussions and Conclusions. A set of the obtained models can help to calculate the accuracy factor value at the stage of process design that will allow predicting reliability of the process accepted for production.

Ключевые слова: вибрационная отделочно-упрочняющая обработка деталей, надежность технологического процесса, шероховатость поверхности, глубина упрочнения, степень деформации, время обработки.

Keywords: final vibration strengthening part processing, process reliability, surface roughness, hardening depth, deformation ratio, processing time.

* Работа выполнена в рамках инициативной НИР.
** E-mail: tehn_rostov@mail.ru, lina_tishenko@mail.ru, roman-viktorovich@yandex.ru
*** The research is done within the frame of the independent R&D.

Образец для цитирования: Тамаркин, М. А. Обеспечение надежности технологических процессов вибрационной отделочно-упрочняющей обработки деталей в среде стальных шаров / М. А. Тамаркин, Э. Э. Тищенко, А. В. Гордиенко, Р. В. Гребенкин // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2017. — Т.17, № 3. — С. 38–45.

For citation: M.A. Tamarkin, E.E. Tishchenko, A.V. Gordiyenko, R.V. Grebenkin. Reliability control of final vibration strengthening of part processing in steel balls medium. Vestnik of DSTU, 2017, vol. 17, no.3, pp. 38–45.

Введение. В современном производстве вопросы обеспечения надежности технологических процессов приобретают все большее значение. Стремление обеспечить требуемый уровень качества продукции и высокую производительность лежит, как правило, в основе разработки любого современного технологического процесса. При этом повышение производительности технологического процесса может привести к снижению качества, или, наоборот, более высокое качество может быть получено за счет низкой производительности. Надежность технологического процесса должна обеспечиваться как по качественным, так и по количественным показателям [1–8].

Под надежностью технологического процесса (ТП) понимают его свойство обеспечивать требуемые точность и качество детали, получаемые обработкой заготовки на одном или на нескольких этапах при условии сохранения на них промежуточных технологических параметров точности и качества в установленных пределах. Согласно ГОСТ 27.202-83 [2], при контроле ТП по рассеянию размеров после обработки поверхности детали для определения его надежности определяют значения показателей точности.

При этом надежность оценивается только по уровням тех показателей и параметров качества продукции, которые непосредственно зависят от технологии изготовления. В процессе анализа надежности следует исходить из заданных показателей качества готового изделия и номинальных значений, которые заранее прописаны в конструкторской документации. Необходимо без рассмотрения технического уровня самих изделий оценить, насколько процесс изготовления обеспечивает соблюдение установленных требований. Несмотря на то, что продукция при реализации такого технологического процесса может быть низкого качества или быстро устаревать морально, сам технологический процесс может обладать высокой надежностью.

Показатели, которыми оценивается надежность технологического процесса, являются универсальными. Безотказность — показатель надежности, обеспечение которого наиболее значимо при разработке технологического процесса. Безотказностью процесса называется его свойство сохранять работоспособность в течение рассматриваемого периода или до выполнения определенного объема работы без вынужденных перерывов (например, на ремонт).

Организация эффективной системы по контролю и управлению качеством процесса сводит отказы к минимуму. Возникновение отказов, связанных именно с технологией, особенно при освоении новых образцов машин, происходит зачастую потому, что параметры технологического процесса близки к предельным, а уровень технологии уже не соответствует возросшим требованиям к изделию и соответствующий запас надежности своевременно не создан. При этом качество готовой продукции напрямую связано с качеством технологического процесса, который своевременно должен быть адаптирован к возросшим требованиям к изготавливаемой продукции. Следовательно, чтобы улучшить качество продукции, следует повысить требования к оборудованию, методам контроля и организации самого процесса. К примеру, при большей сложности и точности изделий растет значение допусков не только на точность размеров, но и на точность формы, взаимное положение отдельных поверхностей.

Основная часть. Наиболее значимыми факторами, оказывающими влияние на выходные параметры объекта управления (технологического процесса) с точки зрения обеспечения его надежности, являются:
— факторы, связанные с поступающей на обработку заготовкой (предел текучести, жесткость, твердость, коэффициент, оценивающий несущую способность контактной поверхности, соответствие материала заготовки материалу, указанному в техническом задании);
— технологические режимы обработки (объем загрузки рабочей камеры, амплитуда и частота колебаний камеры, объем подаваемой технологической жидкости);
— характеристики рабочей среды (диаметры шаров, масса шаров);
— человеческий фактор.

Для анализа надежности технологического процесса, согласно [2], используются коэффициенты надежности. При контроле технологических процессов по количественному признаку определены следующие значения показателей точности.

1. Коэффициент точности (по контролируемому параметру):

$$K_T = \frac{\omega^P}{T},$$

где ω^P — поле рассеяния, или разность максимального и минимального значений контролируемого параметра за установленное (контрольное) время; T — допуск на контролируемый параметр.

При нормальном законе распределения контролируемого параметра

$$\omega^P = 6\sigma,$$

где σ — среднеквадратическое отклонение контролируемого параметра.

Процесс или его элемент стабильно обеспечивают точность контролируемого параметра, если

$$K_T \le K_{TO} \le 1,$$

где $K_{\text{то}}$ — нормативное (предельное, технически обоснованное) значение K_T.

2. Коэффициент мгновенного рассеивания (по контролируемому параметру):

$$K_\rho(\tau) = \frac{\omega^P(\tau)}{T},$$

где $\omega^P(\tau)$ — поле рассеяния контролируемого параметра в момент времени τ.

3. Коэффициент смещения (контролируемого параметра):

$$K_{см}(\tau) = \frac{\overline{\Delta}(\tau)}{T},$$

где $\overline{\Delta}(\tau)$ — среднее значение отклонения контролируемого параметра относительно середины поля допуска в момент времени τ.

Здесь

$$\overline{\Delta}(\tau) = \left|\overline{y}(\tau) - y_0\right|,$$

где $\overline{y}(\tau)$ — среднее значение контролируемого параметра; y_0 — значение параметра, соответствующее середине поля допуска (при симметричном поле допуска значение y_0 совпадает с номинальным значением параметра $y_{\text{ном}}$).

4. Коэффициент запаса точности (по контролируемому параметру):

$$K_з(\tau) = 0,5 - K_{см}(\tau) - 0,5K_\rho(\tau).$$

При контроле точности должно выполняться условие $K_з(\tau) > 0$.

В качестве объекта для исследования надежности выбран технологический процесс вибрационной отделочно-упрочняющей обработки (ВиОУО) в среде стальных шаров. ВиОУО является одним из наиболее перспективных и высокопроизводительных методов обработки деталей машин и приборов. Он обладает большими технологическими возможностями, достаточно легко подвергается механизации и автоматизации. Такой метод обработки может применяться на операциях упрочнения и отделки деталей, скругления острых кромок, подготовки деталей под покрытия (гальванические, лакокрасочные, резиновые, клеевые и др.).

Для расчета параметров надежности исследуемых технологических процессов отделочно-упрочняющей вибрационной обработки необходимо прогнозировать рассеяние показателей качества изготавливаемых деталей. Для этого нужно получить теоретические зависимости для определения среднего арифметического отклонения профиля установившейся шероховатости, глубины упрочнения и степени деформации [9].

Выполнен комплекс теоретических исследований формирования шероховатости обработанной поверхности при ВиОУО. При расчетах сделаны следующие основные допущения: шар, двигаясь под некоторым углом α к обрабатываемой поверхности, внедряется и проходит некоторое расстояние по этой поверхности. Образуется отпечаток, который представляет собой часть эллипсоида. При наложении единичных следов формируется профиль шероховатости поверхности. Для упрощения схемы взаимодействия принято, что диаметры всех шаров одинаковы. Кроме того, учитывается только скольжение шара по поверхности при внедрении, исключая возможное перекатывание. Анализируются только средние вероятностные значения различных параметров единичного взаимодействия.

Скорость соударения шара с поверхностью обрабатываемой детали можно определить по зависимости

$$V_{эф} = k_{эф}A\omega,$$

где A — амплитуда колебаний рабочей камеры; ω — частота колебаний рабочей камеры; $k_{эф}$ — коэффициент, учитывающий влияние соседних шаров при ВиОУО.

Максимальная глубина внедрения шаров в поверхность детали определяется следующим образом:

$$h_{\max} = 2k_{эф}A\omega R\sin\alpha\sqrt{\frac{\rho_ш}{3k_s c\sigma_T}},$$

где R — радиус шаров; $\rho_ш$ — плотность материала шара; σ_T — предел текучести материала детали; c — коэффициент несущей способности контактной поверхности; k_s — коэффициент, учитывающий влияние шероховатости

поверхности детали на площадь фактического контакта.

Проекция пятна контакта шара с поверхностью детали на плоскость представляет собой эллипс с большой и малой полуосями *a* и *b* соответственно, величины которых можно определить по зависимостям:

$$b = \sqrt{R^2 - \left(R - h_{\max}\right)^2} ,$$

$$a = \frac{\pi}{2}\left(ctg\alpha - f\right)h_{\max} + b ,$$

где *f* — коэффициент трения при скольжении шара по материалу обрабатываемой детали.

Среднее арифметическое отклонение профиля установившейся шероховатости поверхности при ВиОУО не изменяется в течение длительного времени при постоянных технологических режимах. Его можно определить как

$$Ra_{уст.} = 0,002\sqrt{\frac{h_{\max} l_{ед} ab}{R^2}} ,$$

где $l_{ед}$ — единичная длина, введенная для сохранения размерности.

При решении технологических задач ВиОУО важное значение имеет аналитический расчет ожидаемого значения глубины упрочнения $h_н$ и степени деформации ε. От толщины упрочненного слоя зависят многие эксплуатационные свойства деталей (усталостная прочность, долговечность и др.). Величина $h_н$ определяет зону поверхностного слоя, в которой имеются остаточная деформация зерен и дислокаций кристаллической решетки. Они образованы в результате приложения внешней нагрузки. Аналитическое определение глубины упрочнения и степени деформации в зависимости от физико-механических свойств материала детали и параметров процесса является очень сложной задачей и рассматривается в работах многих исследователей процесса [5, 9, 10]. При проведении собственных исследований будем учитывать, что с переходом от статического нагружения к ударному возрастает сопротивление материала вдавливанию в него инденторов, т. е. возрастает уровень твердости материала, вследствие чего динамическая твердость $HD_д$ оказывается больше статической *HD*.

Количественной мерой возрастания твердости при динамическом нагружении служит динамический коэффициент твердости η [11], который представляет собой отношение $\eta = \frac{HD_д}{HD}$.

С достаточной для практики точностью зависимость динамического коэффициента твердости от скорости внедрения индентора при обработке стали (как для случая контакта сферы с плоскостью, так и для тел произвольной формы и кривизны) получена в работе Ю. И. Сидякина [11]:

$$\eta = 0,5\left(1 - \frac{137V_0}{HD} + \sqrt{1 + \frac{2250V_0}{HD}}\right),$$

где HD — статическая твердость, Vo — начальная скорость удара.

Это выражение позволяет вычислять динамическую твердость сталей по их статической твердости и начальной скорости удара.

На практике часто необходим перерасчет одних чисел твердости в другие. Этот перерасчет производятся исключительно на основе эмпирических зависимостей, которые не полностью описывают внутренние связи между различными числами твердости. В работе [11] автор предлагает использовать одну из наиболее часто используемых зависимостей для перевода твердости по Бринеллю в динамическую твердость:

$$HB = 0,2HD^{0,89} .$$

С учетом вышеприведенной зависимости и коэффициента твердости, а также условия пластичности Генки — Мизеса [9, 11] при описании пластически деформированной области, распространяющейся на некоторую глубину вокруг остаточной вмятины (пластического отпечатка), получены следующие формулы для расчета глубины упрочнения и степени деформации:

$$h_н = 3,8R\left[1 - \frac{1}{2}\left(1 - \frac{b}{a}\right)^4\right]\sqrt{k_{эф}A\omega\sin\alpha}\sqrt[4]{\frac{\rho_ш}{k_c c\sigma_T}} ,$$

$$\varepsilon = 0,025\sqrt{k_{эф}A\omega}\sqrt[4]{\frac{\rho_ш}{\eta HB^{1,12}}} .$$

Определено время достижения заданной шероховатости при ВиОУО:

$$t_F = \frac{4h_{\max} FR^2}{V_S f_в},$$

где F — число повторяющихся ударов в одну и ту же точку обрабатываемой поверхности; V_S — объем деформируемого металла при единичном взаимодействии шара с обрабатываемой поверхностью.

Для проверки достоверности предложенных теоретических моделей формирования шероховатости поверхности, глубины упрочнения и степени деформации при ВиОУО проведены комплексные экспериментальные исследования. Рассмотрено влияние амплитуды рабочей камеры, размеров среды и твердости материала детали по Бринеллю на формирование шероховатости поверхности, глубины упрочнения и степени деформации при ВиОУО. Приведено сравнение результатов теоретических и экспериментальных исследований. Анализ результатов проведенных экспериментальных исследований позволяет установить адекватность предложенных теоретических зависимостей. Разница между теоретическими и экспериментальными данными не превышает 20 %.

Пользуясь комплексом моделей процесса ОУ ЦРО можно рассчитать величину показателей точности процесса на стадии технологического проектирования, что позволит прогнозировать надежность принятого к производству технологического процесса.

При проведении исследований авторами установлено, что надежность технологического процесса определяется величиной допуска на контролируемый параметр качества обработки. Проведено компьютерное моделирование влияния величины допуска контролируемого параметра на надежность технологического процесса. Выполнены расчеты параметров надежности при возможном разбросе амплитуды и частоты колебаний рабочей камеры в пределах 5, 10 и 15 процентов при обработке деталей из различных материалов (сталей и цветных сплавов). Некоторые результаты исследований представлены на рис. 1–3.

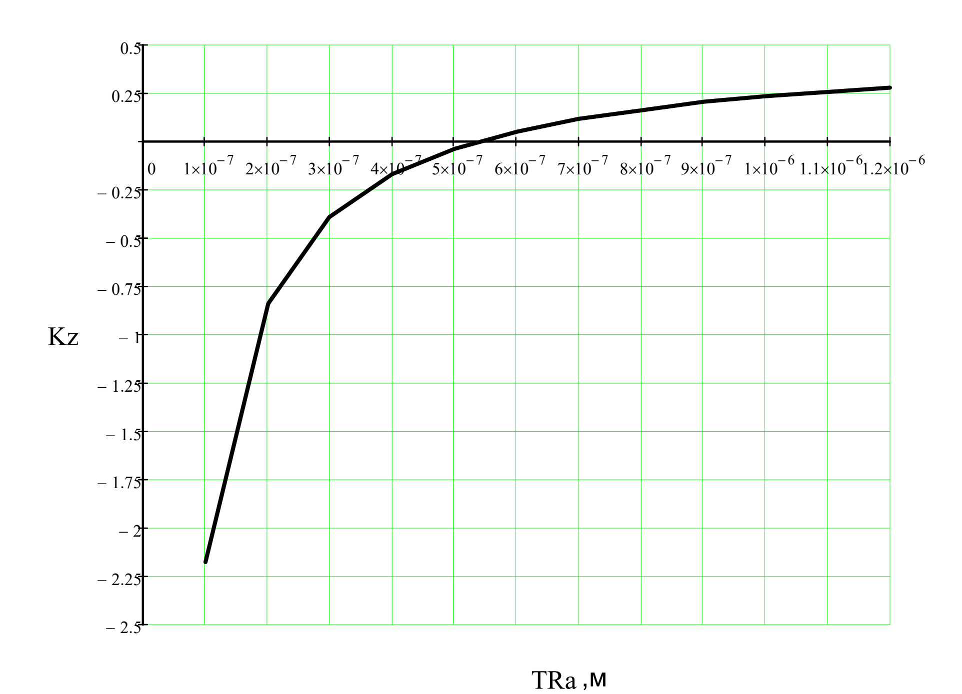


Рис. 1. Влияние величины допуска на надежность технологического процесса. Контролируемый параметр — шероховатость поверхности *Ra*: диапазон изменения допуска 0,1–1,2 мкм с шагом 0,1 мкм; диаметр шарика — 10 мм; амплитуда — 2,5 мм; частота — 26,7 Гц; материал — сталь 20; разброс — 5 %

Fig. 1. Effect of tolerance level on process reliability. Controlled parameter – surface roughness Ra: tolerance turndown 0.1–1.2 µm in 0.1 µm increment; ball diameter is 10 mm; amplitude – 2.5 mm; frequency – 26.7 Hz; material – steel 20; spread – 5%

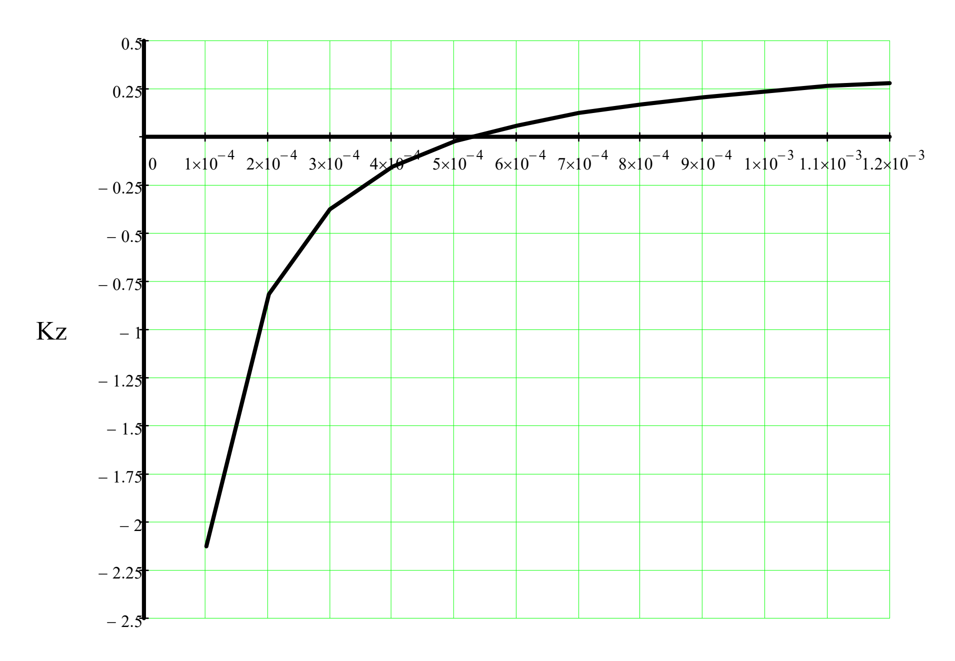


Рис. 2. Влияние величины допуска на надежность технологического процесса. Контролируемый параметр — глубина упрочненного слоя $h_н$: диапазон изменения допуска 0,1–1,2 мм с шагом 0,1 мм; диаметр шарика — 8 мм; амплитуда — 2,5 мм; частота — 26,7 Гц; материал детали — сталь 45; разброс 10 %

Fig. 2. Effect of tolerance level on process reliability. Controlled parameter – hardened layer depth $h_н$: tolerance turndown 0.1-1.2 mm in 0.1 mm increment; ball diameter is 8 mm; amplitude – 2.5 mm; frequency – 26.7 Hz; part material – steel 45; spread – 10%

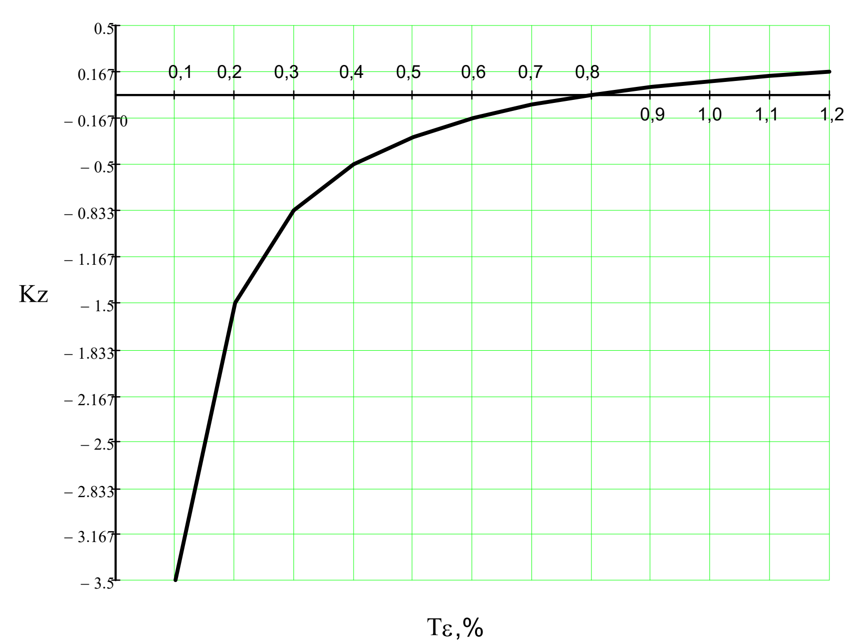


Рис. 3. Влияние величины допуска на надежность технологического процесса. Контролируемый параметр — степень деформации ε: диапазон изменения допуска — 0,1–1,2 % с шагом 0,1 %; диаметр шарика — 10 мм; амплитуда — 2,5 мм; частота — 26,7 Гц; материал детали — сталь 45; разброс — 10 %

Fig. 3. Effect of tolerance level on process reliability. Controlled parameter –deformation ratio ε: tolerance turndown – 0.1-1.2% in 0.1% increment; ball diameter – 10 mm; amplitude – 2.5 mm; frequency – 26.7 Hz; part material – steel 45; spread – 10%

Заключение. Пользуясь комплексом полученных для ВиОУО моделей, можно рассчитать величину показателей точности на стадии технологического проектирования, что позволит прогнозировать надежность технологического процесса, принятого к производству. Показатели точности процесса рассчитываются по формулам, полученным выше. Вводятся поля рассеяния исходных величин (технологических режимов и физико-механических свойств материала детали). Далее определяются поля рассеяния значений контролируемого параметра, среднее значение отклонения контролируемого параметра относительно середины поля допуска. Рассчитывается значение коэффициента запаса

точности. В случае выполнения условия $K_3 > 0$ рассчитывается время обработки для каждого варианта сочетания технологических параметров и выбирается вариант, обеспечивающий минимальное время обработки, которое и считается рациональным.

Анализируя результаты проведенных исследований, можно сделать вывод, что технологический процесс ВиОУО обеспечивает получение требуемых параметров качества поверхности детали в ходе обработки в пределах величины поля допуска в определенном интервале изменения технологических режимов и характеристик рабочих сред.

Библиографический список

1. Корольков, Ю. В. Повышение надежности технологического процесса центробежно-ротационной обработки в среде абразива : дис. … канд. техн. наук / Ю. В. Корольков. — Ростов-на-Дону, 2011. — 167 с.

2. ГОСТ 27.202-83. Надежность в технике. Технологические системы. Технические требования к методам оценки надежности по параметрам производительности / Государственный комитет СССР по стандартам. — Москва : Издательство стандартов. — 51 с.

3. Рыжкин, А. А. Основы теории надежности / А. А. Рыжкин, Б. Н. Слюсарь, К. Г. Шучев. — Ростов-на-Дону : Изд. центр ДГТУ, 2002. — 182 с.

4. Андросов, А. А. Надежность технических систем / А. А. Андросов. — Ростов-на-Дону : Изд. центр ДГТУ, 2000. — 169 с.

5. Дрозд, М. С. Инженерные расчеты упругопластической контактной деформации / М. С. Дрозд, М. М. Матлин, Ю. И. Сидякин. — Москва : Машиностроение, 1986. — 224 с.

6. Propagation of a pressure step in a granular material: The role of wall friction / T. Boutreaux [et al.] // Physical Review E. — 1997. — Vol. 55, № 5b. — P. 57–59.

7. Jaeger, M. Granular solids, liquids, and gases / M. Jaeger, S.-R. Nagel, R.-P. Behringer // Reviews of Modern Physics. — 1996. — Vol. 68. — P. 1259–1273.

8. Impact Damper with Granular Materials for Multibody System / I. Yokomithi [et al.] // Journal of Pressure Vessel Technology. — 1996. — Vol. 11. — P. 160–166.

9. Тамаркин, М. А. Повышение качества поверхностного слоя деталей при обработке поверхностным пластическим деформированием в гибких гранулированных средах / М. А. Тамаркин, Э. Э. Тищенко, В. Г. Лебеденко // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2009. — Т. 9, № 3. — С. 213–223.

10. Tamarkin, M. A. Surface-layer quality in shot treatment / M. A. Tamarkin, E. E. Tishchenko, V. G. Lebedenko // Russian Engineering Research. — 2010. — Vol. 30, № 2. — P. 144–148.

11. Сидякин, Ю. И. Разработка методов расчета упругопластических контактных деформаций в процессах упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием : автореф. … дис. докт. техн. наук / Ю. И. Сидякин. — Москва, 2002. — 34 с.

References

1. Korolkov, Y.V. Povyshenie nadezhnosti tekhnologicheskogo protsessa tsentrobezhno-rotatsionnoy obrabotki v srede abraziva: dis. … kand. tekhn. nauk. [Increase in reliability of centrifugal-rotary processing in abrasive environment: Cand.Sci. (Eng.) diss.] Rostov-on-Don, 2011, 167 p. (in Russian).

2. GOST 27.202-83. Nadezhnost' v tekhnike. Tekhnologicheskie sistemy. Tekhniche-skie trebovaniya k metodam otsenki nadezhnosti po parametram proizvoditel'nosti. [GOST 27.202-83. Reliability in technique. Technological systems. Methods of reliability evaluation by parameters of product quality.] USSR State Standards Committee. Moscow: Standartinform, 51 p. (in Russian).

3. Ryzhkin, A.A., Slyusar, B.N., Shuchev, K.G. Osnovy teorii nadezhnosti. [Reliability theory fundamentals.] Rostov-on-Don: DSTU Publ. Centre, 2002, 182 p. (in Russian).

4. Androsov, A.A. Nadezhnost' tekhnicheskikh sistem. [Reliability of engineering systems.] Rostov-on-Don: DSTU Publ. Centre, 2000, 169 p. (in Russian).

5. Drozd, M.S., Matlin, M.M., Sidyakin, Y.I. Inzhenernye raschety uprugoplasticheskoy kontaktnoy deformatsii. [Engineering analysis of elastoplastic contact deformation.] Moscow: Mashinostroenie, 1986, 224 p. (in Russian).

6. Boutreaux, T., et al. Propagation of a pressure step in a granular material: The role of wall friction. Physical Review E. 1997, vol. 55, no. 5b, pp. 57–59.

7. Jaeger, M., Nagel, S.-R., Behringer, R.-P. Granular solids, liquids, and gases. Reviews of Modern Physics, 1996, vol. 68, pp. 1259–1273.

8. Yokomithi, I., et al. Impact Damper with Granular Materials for Multibody System. Journal of Pressure Vessel Technology, 1996, vol. 11, pp. 160–166.

9. Tamarkin, M.A., Tishchenko, E.E., Lebedenko, V.G. Povyshenie kachestva poverkhnostnogo sloya detaley pri obrabotke poverkhnostnym plasticheskim deformirovaniem v gibkikh granulirovannykh sredakh. [Improvement of quality of the blanket of details at processing by superficial plastic deformation in the flexible granulated environments.] Vestnik of DSTU, 2009, vol. 9, no. 3, pp. 213–223 (in Russian).

10. Tamarkin, M.A., Tishchenko, E.E., Lebedenko, V.G. Surface-layer quality in shot treatment. Russian Engineering Research, 2010, vol. 30, no. 2, pp. 144–148.

11. Sidyakin, Y.I. Razrabotka metodov rascheta uprugoplasticheskikh kontaktnykh deformatsiy v protsessakh uprochneniya detaley poverkhnostnym plasticheskim deformirovaniem : avtoref. … dis. dokt. tekhn. nauk. [Development of methods for calculating elastoplastic contact deformations in processes of parts hardening by surface plastic deformation: Dr.Sci. (Eng.) diss., author's abstract.] Moscow, 2002, 34 p. (in Russian).

Поступила в редакцию 22.03.2017
Сдана в редакцию 29.03.2017
Запланирована в номер 03.04.2017

Received 22.03.2017
Submitted 29.03.2017
Scheduled in the issue 03.04.2017

Об авторах:

Тамаркин Михаил Аркадьевич,
заведующий кафедрой «Технология машиностроения» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор технических наук, профессор,
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-9558-8625
tehn_rostov@mail.ru

Тищенко Элина Эдуардовна,
доцент кафедры «Технология машиностроения» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, доцент,
ORCID: http://orcid.org/0000-0003-4439-5350
lina_tishenko@mail.ru

Гордиенко Александр Владимирович,
доцент кафедры «Технология машиностроения» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, доцент,
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-7624-0295
gordiernkoav@mail.ru

Гребёнкин Роман Викторович,
соискатель кафедры «Технология машиностроения» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1),
ORCID: http://orcid.org/0000-0003-4439-5350
roman-viktorovich@yandex.ru

Authors:

Tamarkin, Mikhail A.
associate professor of the Engineering Technology Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin sq., 1), Dr..Sci. (Eng.), professor,
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-9558-8625
tehn_rostov@mail.ru

Tishchenko, Elina E.,
associate professor of the Engineering Technology Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin sq., 1), Cand.Sci. (Eng.), associate professor,
ORCID: http://orcid.org/0000-0003-4439-5350
lina_tishenko@mail.ru

Gordienko, Alexander V.,
associate professor of the Engineering Technology Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin sq., 1), Cand.Sci. (Eng.), associate professor,
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-7624-0295
gordiernkoav@mail.ru

Grebenkin, Roman V.,
Ed.D. Candidate of the Engineering Technology Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin sq., 1),
ORCID: http://orcid.org/0000-0003-4439-5350
roman-viktorovich@yandex.ru